

А. В. АШКЕЛЯНЕЦЬ, Д. В. КОНОВОДОВ, В. В. АНДРЕЄВ, О. В. БОНДАРЕНКО

ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМОЗМІНИ ТА НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПРИ ВІЛЬНОМУ КУВАННІ ЗАГОТОВОК ІЗ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ З ПИТОМОЮ МІЦНІСТЮ БІЛЬШЕ $120 \text{ м}^2/\text{с}^2$

Застосування в сучасній промисловості нових матеріалів з особливими властивостями, наприклад, питома міцність яких $120 \text{ м}^2/\text{с}^2$, найактуальніше завдання. Одними з таких матеріалів є високоміцні алюмінієві сплави системи Al-6%Mg, які додатково леговані скандієм. Наявність зниженої пластичності в традиційних умовах деформації призводить до складності/неможливості їх обробки, що пов'язано з можливою появою гарячих тріщин. Сучасні технології деформаційної обробки високоміцних сплавів включають в себе операції попередньої обробки литої структури – гомогенізації, і проміжну термічну обробку – відпал. Використання зазначених технологічних операцій при виробництві готових виробів призводить до суттєвого підвищення їх собівартості. Використання операцій вільного кування в якості попередньої обробки литої структури перед прямим пресуванням дозволить уникнути витрат на термічну обробку матеріалу.

Виконано дослідження формозміни і напруженого стану металу при вільному куванні заготовок з алюмінієвого сплаву Al-6%Mg, які леговані скандієм. Для досягнення зазначеної мети в роботі поставлені наступні задачі: створення математичної моделі операцій осадження і «протягання»; аналіз формозміни заготовок, отриманих при моделюванні, шляхом порівняння з експериментальними даними; дослідження напруженого стану металу з метою оцінки можливого пропрацювання структури металу. Дослідження операцій осадження і протягання проведено для умов: температура нагріву заготовки – 400°C ; температура робочого інструмента – 200°C ; устаткування – пневматичний молот зі швидкістю переміщення інструменту 6000 мм/с .

Аналіз формозміни заготовок показав високу точність математичної моделі, відносна похибка якої не перевищує 5%, в порівнянні з експериментальними даними. Встановлено, що спільне використання операцій осадження і подальше протягання призводить до суттєвого пропрацювання металу, однак, в свою чергу, і носить негативний характер – можлива поява тріщин в центральній області зразка, що пов'язано з виникненням високих за величиною напружень, що розтягують.

Ключові слова: алюміній, скандій, заготовка, математична модель, осадження, протягання, формозміна, напруження.

А. В. АШКЕЛЯНЕЦЬ, Д. В. КОНОВОДОВ, В. В. АНДРЕЄВ, О. В. БОНДАРЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ СВОБОДНОЙ КОВКЕ ЗАГОТОВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА С УДЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ БОЛЬШЕ $120 \text{ м}^2/\text{с}^2$

Применение в современной промышленности новых материалов с особыми свойствами, например, удельная прочность которых $120 \text{ м}^2/\text{с}^2$, наиболее актуальная задача. Одними из таких материалов являются высокопрочные алюминиевые сплавы системы Al-6%Mg, которые дополнительно легированы скандием. Наличие сниженной пластичности в традиционных условиях деформации приводит к сложности/невозможности их обработки, что связано с возможным появлением горячих трещин. Современные технологии деформационной обработки высокопрочных сплавов включают в себя операции предварительной обработки литой структуры – гомогенизации, и промежуточную термическую обработку – отжиг. Использование указанных технологических операций при производстве готовых изделий приводит к существенному повышению их себестоимости. Использование операций свободнойковки в качестве предварительной обработки литой структуры перед прямым прессованием позволит избежать затрат на термическую обработку материала.

Выполнено исследование формоизменения и напряженного состояния металла при свободной ковке заготовок из алюминиевого сплава Al-6%Mg, которые легированы скандием. Для достижения указанной цели в работе поставлены задачи: создание математической модели операций «осадка» и «протяжка»; анализ формоизменения заготовок, полученных при моделировании, путем сравнения с экспериментальными данными; исследование напряженного состояния металла с целью оценки возможной проработки структуры металла.

Исследование операций «осадка» и «протяжка» проведены для условий: температура нагрева заготовки – 400°C ; температура рабочего инструмента – 200°C ; оборудование – пневматический молот со скоростью перемещения инструмента 6000 мм/с .

Анализ формоизменения заготовок показал высокую точность математической модели, относительная погрешность которой не превышает 5%, в сравнении с экспериментальными данными. Установлено, что совместное использование операций осадки и протяжки приводит к существенной проработки металла, однако, в свою очередь, и носит негативный характер – возможное появление трещин в центральной области образца, что связано с возникновением высоких по величине растягивающих напряжений.

Ключевые слова: алюминий, скандий, заготовка, математическая модель, осадка, протяжка, формоизменение, напряжение.

A. V. ASHKELIANETS, D. V. KONOVODOV, V. V. ANDREIEV, O. V. BONDARENKO

INVESTIGATION OF FORM CHANGE AND STRESS STATE IN THE FREE FORGING OF ALUMINUM ALLOY BILLET WITH A SPECIFIC STRENGTH MORE THAN $120 \text{ м}^2/\text{с}^2$

The use of new materials with special properties in modern industry, for example, the specific strength of which is $120 \text{ м}^2/\text{с}^2$, is the most actual task. One of such materials are high-strength aluminum alloys of the Al-6%Mg system, which are additionally alloyed with scandium. The presence of reduced ductility in traditional deformation conditions leads to the complexity/impossibility of their processing, which is associated with the possible appearance of hot cracks. Modern technologies of deformation processing of high-strength alloys include pretreatment operations of the cast structure – homogenization, and intermediate heat treatment – annealing. The use of these technological operations in the production of finished products leads to a significant increase in their cost. The use of free forging operations as a pretreatment of the cast structure before to direct extrusion will avoid the cost of heat treatment of the material.

The study of the form-changes and stress state of the metal in the free forging of billets of aluminum alloy Al-6%Mg, which are alloyed with scandium was done. To achieve this goal in the work set tasks: the creation of a mathematical model of operations upsetting and forging drawing; analysis of the form-changes of the billet which obtained in the simulation, by comparison with experimental data; study of the stress state of the metal in order to assess the possible pretreatment of the metal structure. The investigations of the operations upsetting and forging drawing were carried out for the following conditions: the heating temperature of the billet is 400°C ; working tool temperature is 200°C ; equipment is a pneumatic hammer with a tool displacement speed of 6000 мм/с .

The analysis of the form-changes billets showed a high accuracy of the mathematical model, the relative error of which does not exceed 5% in comparison with the experimental data. It has been established that the joint use of upsetting and forging drawing leads to a substantial averaging of the metal structure, however, in turn, and is negative – the possible appearance of cracks in the central zone of the sample, which is associated with the occurrence of high tensile stresses.

Keywords: aluminum, scandium, billet, mathematical model, upsetting, forging drawing, form-changes, stress.

Вступ. Актуальною задачею сучасного виробництва металів та сплавів є отримання матеріалів з особливими властивостями. Обробка тиском таких матеріалів дозволяє отримати вироби з підвищеними експлуатаційними характеристиками. Однією з таких характеристик є питома міцність. Високі значення даного показника важливі при створенні конструкцій та деталей машин, які володіють високою міцністю при малій вазі.

До сплавів з високою питомою міцністю можна віднести алюмінієві сплави системи Al-Mg, які леговані скандієм, зокрема сплави із вмістом 5,5...6,5% мас. Mg та 0,3...0,5% мас. Sc. Межа міцності виробів із даних сплавів після кінцевої деформаційної обробки досягає 390-410 МПа [1], що відповідає величині питомої міцності $120 \text{ м}^2/\text{с}^2$. На даний час вказані сплави розглядаються в промисловості як заміники дюралюмінію та нержавіючих сталей. За хімічним складом вони близькі до традиційних алюмінієво-магнієвих сплавів та відрізняються лише наявністю скандію. Недоліком вищевказаних сплавів є складність обробки тиском, що пов'язано з їх низькою пластичністю у звичайних умовах деформації. Тому дослідження процесів обробки тиском цих сплавів куванням є актуальними.

Аналіз відомих публікацій. Відомо, що рекомендований діапазон температур гарячої деформації сплавів Al-6%Mg, які леговані скандієм складає 370-530 °C [2, 3]. Цей інтервал температур обрано із-за наявності максимуму пластичності матеріалу в гарячому стані. В той самий час гаряча деформація в цій області температур часто супроводжується утворенням гарячих тріщин і навіть руйнуванням зразків в процесі обробки тиском. У науковій літературі існують дані, які виділяють дві головні причини появи тріщин у процесі деформації сплавів Al-Mg-Sc: оплавлення границь зерен та наявність концентраторів напружень на границях зерен у вигляді плівкових фаз [4]. Однак, якщо першу проблему можна вирішити шляхом використання процесу високотемпературної формовки в умовах надпластичності [5], то для мінімізації другого – необхідна попередня гомогенізація структури вихідних заготовок.

З метою зменшення вірогідності появи тріщин використовують термічну обробку виливка, яка забезпечує вирівнювання хімічного складу по магнію [6, 7]. Наприклад, для алюмінієвого сплаву з вмістом 5,8% Mg та 0,3% Sc тривалість термічної обробки складає 25...100 годин [8].

В роботі [9], при виробництві заготовок з титанового сплаву, запропоновано, у якості попередньої обробки, використовувати процеси осадки та кручення. Показано, що попередня деформаційна обробка дозволяє отримати рівноосну дрібнозернисту структуру. Такий підхід може бути використаний при обробці тиском сплавів Al-6%Mg, які додатково леговані скандієм, з метою підготовки литої структури для подальшої деформації. Це дає змогу уникнути довготривалої термічної обробки (гомогенізації). Однак, на даний час відсутні відомості

про поведінку вказаних сплавів в процесах вільного кування.

Метою даної роботи є дослідження формозміни та напруженого стану металу при вільному куванні заготовок із алюмінієвого сплаву Al-6%Mg, який додатково легований скандієм (5,8% мас. Mg та 0,3% мас. Sc).

Результати роботи. Дослідження формозміни та напруженого стану при вільному куванні заготовки зі сплаву Al-6%Mg, виконано шляхом математичного моделювання у програмі Forge3. Використання ліцензійного програмного продукту (ПП) Forge3 [10], який засновано на базі методу скінчених елементів, дозволило виконати теоретичне дослідження двох операцій кування: попереднє осадження та наступне протягання заготовки. Можливість використання вказаного ПП надана в рамках проекту DAAD «Praxispartnerschaft Metallurgie» в університеті ім. Лейбніца (м. Ганновер, Федеративна Республіка Німеччина).

Осадження виконували в підкладному кільці з метою формування хвостовика у нижній частині заготовки. Хвостовик використовувався для утримання заготовки при виконанні операції протягання.

Результати математичного моделювання операції осадження, а саме формозміна заготовки, були порівняні з результатами натурного експерименту з метою перевірки точності заданих граничних умов при математичному моделюванні.

При виконанні операції осадження була обрана ступінь деформації 20% і 40%. Температура нагріву заготовки $T_0=400 \text{ °C}$; температура інструменту $T_{\text{інстр}}=200 \text{ °C}$; діаметр та висота заготовки складали відповідно $D_0=40 \text{ мм}$ та $H_0=80 \text{ мм}$. В якості деформуючого обладнання був обраний пневматичний молот зі швидкістю переміщення інструменту $V_{\text{молот}}=6000 \text{ мм/с}$. Для опису реологічних властивостей матеріалу вихідної заготовки було обрано модель Хензеля-Шпіттеля із коефіцієнтами рівняння регресії, які попередньо отримані після статистичної обробки пластометричних випробувань в гарячому стані [11].

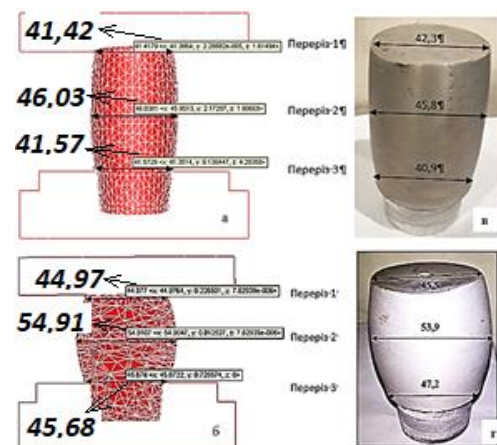


Рис. 1 – Формозміна заготовки при виконанні операції осадження: а, б – розміри зразків у контрольних перерізах, що отримані при математичному моделюванні зі ступенем деформації 20% та 40% відповідно; в, г – розміри зразків у контрольних перерізах, які отримані при фізичному моделюванні зі ступенем деформації 20% та 40% відповідно

З метою аналізу формозміни заготовки після проведення операції осадження, були обрані контрольні перерізи: 1 – верхній діаметр у перерізі осадженого зразка; 2 – середина висоти осадженого зразка, яка відповідає діаметру по бочці; 3 – нижній діаметр у перерізі осадженого зразка.

На рис. 1 наведено перерізи зразків, які отримані у результаті математичного та фізичного моделювання операції осадження.

На рис. 2 наведено співставлення результатів математичного та фізичного моделювання щодо формозміни зразків під час виконання операції осадження.

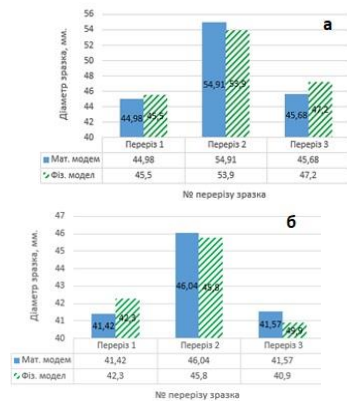


Рис. 2 – Співставлення експериментальних даних та результатів математичного моделювання формозміни заготовки при осадженні: а – ступінь деформації 20%; б – ступінь деформації 40%

З рисунку 2 видно, що розбіжність між теоретичними та експериментальними даними формозміни заготовки не перевищує 5%.

Напружено-деформований стан заготовки в процесі осадження, характеризували величиною та розподілом напружень і показника деформації.

На рис. 3 наведено результати математичного моделювання щодо розподілу напружень та показника деформації у поперечному перерізі заготовки при осадженні зі ступенем деформації 20%.

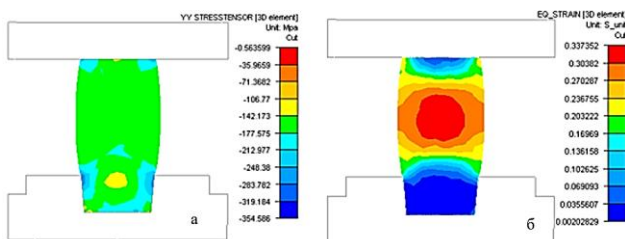


Рис. 3 – Результати математичного моделювання напружень на деформації при осаджуванні зразка циліндричної форми в підкладному кільці зі ступенем деформації 20%:

а – розподіл напружень по перерізу зразка; б – розподіл показника деформації по перерізу зразка.

При аналізі зображення (рис. 3, а), на якому наведено розподіл напружень по перерізу заготовки, видно, що по всьому перерізу зразка всі напруження стискаючі та знаходяться в діапазоні від -212 МПа до -106 МПа. Це свідчить про те, що при даному ступені деформації зразок буде деформуватися без руйнування чи утворення тріщин на боковій поверхні. При проведенні експериментальних досліджень це

підтвердилось оглядом отриманих зразків (див. рис. 1, в).

Показник деформації (рис. 3, б) вказує на пропрацювання структури матеріалу зразка. З рис. 3, а видно, що найбільше значення цього показника складає 0,33 та знаходиться в центральній частині, але ця частина має невеликий розмір відносно розміру всього перерізу, що свідчить про досить велику неоднорідність деформації. Це може призвести до отримання неоднорідної структури при виконанні подальшої операції протягання.

З рис. 4, а видно, що напруження, які виникають по перерізу зразка при ступені деформації 40%, стискаючі, та знаходяться в діапазоні від -258 МПа до -57 МПа.

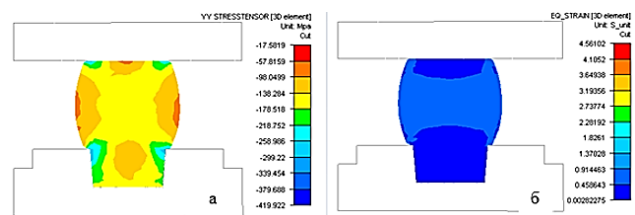


Рис. 4 – Результати математичного моделювання напружень та деформації при осаджуванні зразка циліндричної форми в підкладному кільці зі ступенем деформації 40%:

а – розподіл напружень по перерізу зразка; б – розподіл показника деформації по перерізу зразка

Це також свідчить, що при деформації 40% зразок формозмінюється без утворення поверхневих дефектів, що підтверджується експериментальними дослідженнями (рис. 1, г). Але на зовнішній поверхні зразка напруження, які виникають в процесі деформації мають набагато менші значення ніж у центральній частині. Це вказує на те, що при збільшені ступеня деформації на поверхні зразка, напруження можуть змінитися зі стискаючих на розтягуючі, що може призвести до утворення тріщин.

Аналіз показника деформації (рис. 4, б) вказує на те, що при ступеню деформації 40% пропрацювання структури зразка краще і більш однорідне, ніж при ступені деформації 20%. На зображенні видно, що найбільше значення цього показника дорівнює 1,82 та знаходиться майже по всьому перерізу зразка окрім хвостової частині і зони прилипання на контакті з верхнім інструментом. Це свідчить про те, що при подальшій деформації при виконанні операції протягання буде отримано більш однорідний розподіл показника деформації.

Для моделювання процесу протягання були використані дані про напружено-деформований стан заготовки після операції осадження. Вихідні розміри заготовки дорівнювали тим, які були отримані після попередньої операції осадження. Кінцевий діаметр заготовки при математичному моделювання дорівнював 45 мм.

Температура нагріву заготовки складала $T_0=400$ °C; температура інструменту – $T_{інстр}=200$ °C. У якості деформуючого обладнання був обраний пневматичний молот із швидкістю переміщення інструменту $V_{молот}=6000$ мм/с.

На рис. 5 представлено вид зразка до і після виконання операції протягання. Операція протягання виконувалась з чітко обумовленими кутами кантування, які варіювались від 15° до 90° та послідовною подачею на задану величину в діапазоні 0,4-0,8 ширини бойка молота.

На рис. 5, а зображена вихідна заготовка для моделювання операції протягання, яка отримана після виконання операції осадження.

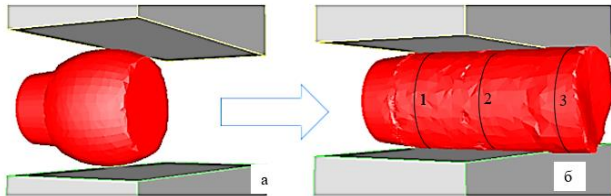


Рис. 5 – Формозміна осадженого зразка при виконанні операції протягання: а – форма зразка до виконання операції протягання; б – форма зразка після виконання операції протягання

На рис 5, б наведено форма зразка після операції протягання, а також місця контрольних перерізів для подальшого аналізу отриманих результатів.

На рис. 6, а наведено розподіл напружень та показника деформації по перерізам зразка 1, 2, 3 (см. рис. 5, б) після виконання операції протягання.

В 1-му та 2-му перерізі напруження, які виникають, мають стискаючий характер і знаходяться в діапазоні від -79 МПа до -17 МПа. У 3-му перерізі, в центральній частині, мають місце напруження розтягнення з величиною 4 МПа. Це свідчить про те, що в центральній частині переднього кінця заготовки є велика ймовірність утворення тріщин.

На рис. 6, б наведено показник деформації, величина якого знаходиться у діапазоні від 2,56 до 3,36. Ці значення є більшими ніж при операції осадження. Аналіз цього показника по перерізам показав, що бочкоутворення, яке з'являється після виконання операції осадження, призводить до неоднорідності деформації по довжині заготовки.

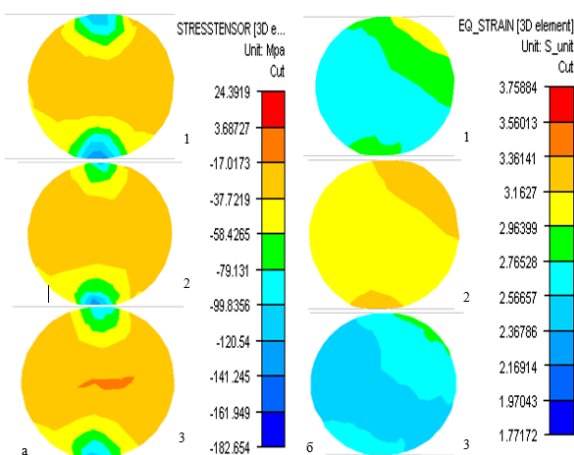


Рис. 6 – Результати математичного моделювання напружень та деформації при виконанні операції протягання попередньо осадженого зразка: а – розподіл напружень у контрольних перерізах заготовки; б – розподіл показника деформації у контрольних перерізах заготовки

З рис. 6, б видно, що у 2-му перерізі показник деформації має найбільші значення і знаходиться в

діапазоні від 2,96 до 3,36. При цьому у 1-му та 3-му перерізах, цей показник має від 2,36 до 3,16.

Для перевірки результатів математичного моделювання операції протягання, були проведені експериментальні дослідження протягання попередньо осаджених зразків. На рис. 7 наведено фото отриманого зразка.



Рис. 7 – Вигляд попередньо осадженого зразка після операції протягання

Результати експериментальних досліджень підтвердило адекватність математичної моделі. Це вказує на вірний вибір граничних умов та реологічних властивостей матеріалу при проведенні математичного моделювання. Також математична модель дозволяє прогнозувати напружено-деформований стан заготовки у процесі протягання. Це підтверджується утворенням дефекту в центральній частині на передньому кінці заготовки, яке викликають напруження розтягання.

Висновки. Запропоновано для гомогенізації структури сплаву системи Al-6%Mg, який додатково легований скандієм, застосовувати операції осаджування та протягання.

Створено математичну модель процесу осаджування та протягання у програмі Forge3. Досліджено формозміну заготовки зі сплаву системи Al-6%Mg при осадженні зі ступенями деформації 20% та 40%. Порівняльний аналіз даних математичного моделювання з результатами експериментальних досліджень показав, що різниця у геометричних розмірах зразків після осадження при математичному моделюванні та натурному експерименті не перевищує 5%.

Досліджено напружено-деформований стан заготовки зі сплаву системи Al-6%Mg при осадженні та протяганні. Встановлено, що при осадженні зі ступенем деформації 40%, деформації розподіляється по перерізу заготовки більш рівномірно. Також встановлено, що при виконанні наступної операції протягання, на передньому кінці, в середині заготовки, можуть виникати напруження розтягання. Наявність цих напружень може призводити до появи дефектів у вигляді тріщин. Даний факт був підтверджений експериментальними дослідження операції протягання на пневматичному молоті.

Отримана математична модель може бути використана для прогнозування формозміни та напружено-деформованого стану заготовки зі сплаву системи Al-6%Mg, який додатково легований скандієм, при виконання операцій вільного кування – осадження та протягання.

Список літератури

1. Бронз А. В. Сплав 1570с – материал для герметичных конструкций перспективных многофазовых изделий РКК «Энергия» / [Бронз А.В., Ефремов В.И., Плотников А.Д., Чернявский А.Г.] // Космическая техника и технологии. – 2014. – № 4 (7). – С. 62–67.
2. Автократова Е.В. Перспективный Al-Mg-Sc сплав для самолетостроения / Е. В. Автократова // Вестник уфимского государственного авиационного технического университета. – 2007. – Т. 9. – № 1. – С. 182–183.
3. Royset J. Kinetics and mechanisms of precipitation in an Al–0.2 wt. % Sc alloy / Royset J., Ryum N. // Materials Science and Engineering. – 2005. – A 39 – PP. 409–422. – doi: 10.1016/j.msea.2005.02.015.
4. Филатов Ю.А. Деформируемые сплавы на основе системы Al-Mg-Sc и перспективы их применения в автомобилестроении / Ю.А. Филатов // Цветные металлы. – 1997. – № 2. – С. 60–62.
5. Автократова Е.В. Перспективный Al-Mg-Sc сплав для самолетостроения / Е. В. Автократова // Вестник уфимского государственного авиационного технического университета. – 2007. – Т. 9. – № 1. – С. 182–183.
6. Добаткин, В. И. Гранулируемые алюминиевые сплавы / В. И. Добаткин, В. И. Елагин. – М.: Металлургия, 1981. – 176 с.
7. Бокштейн Б. С. Диффузия в металлах. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
8. Приходько М. В. Дослідження впливу гомогенізації на структурні зміни в алюмінієвому сплаві Al-Mg-Mn-Sc / [М. В. Приходько, В. В. Андреев, О. Ф. Леднянский, О. В. Бондаренко] // Пластическая деформация металлов. : сб. научн. трудов в 2-х томах. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – Т. 2. – С. 237–241.
9. А. Е. Волков. Деформация сдвигом методом кручения, осадки и прессования / Волков А. Е. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2016. – Т. 16. – № 4. – С. 129–139. – DOI: 10.14529/met160415
10. J. L. Chenot / Forge 3 – a general tool for practical optimization of forging sequence of complex three-dimensional parts in industry / Chenot J. L., Fourment L., Coupez T, Ducloux R., Wey E. // Forging and Related Technology. – Birmingham, (UK). – 1998. – P. 113–122.
11. Исследование реологических свойств алюминиевого сплава системы Al-Mg-Sc / А. Н. Головкин, Я. В. Фролов, В. В. Андреев [и др.] // Теория и практика металлургии. – 2012. – No1-2 (90-91). – С. 98–100.

References (transliterated)

1. Bronz A. V. Splav 1570s – material dlya germetichnykh konstruktсий perspektivnykh mnogorazovykh izdeliy RKK «Energiya» / [Bronz A.V., Yefremov V.I., Plotnikov A.D., Chernyavskiy A.G.] // Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii. – 2014. – No 4 (7). – P. 62–67.
2. Avtokratova Ye.V. Perspektivnyy Al-Mg-Sc splav dlya samoletostroyeniya / Ye. V. Avtokratova // Vestnik ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. – 2007. – Vol. 9. – No 1. – P. 182–183.
3. Royset J. Kinetics and mechanisms of precipitation in an Al–0.2 wt. % Sc alloy / Royset J., Ryum N. // Materials Science and Engineering. – 2005. – A 39 – PP. 409–422. – doi: 10.1016/j.msea.2005.02.015.
4. Filatov YU.A. Deformiruyemye splavy na osnove sistemy Al-Mg-Sc i perspektivy ikh primeneniya v avtomobilestroyenii / YU.A. Filatov // Tsvetnyye metally. – 1997. – No 2. – P. 60–62.
5. Avtokratova Ye.V. Perspektivnyy Al-Mg-Sc splav dlya samoletostroyeniya / Ye. V. Avtokratova // Vestnik ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta. – 2007. – Vol. 9. – No 1. – P. 182–183.
6. Dobatkin, V. I. Granuliruyemye alyuminiyevyye splavy / V. I. Dobatkin, V. I. Yelagin. – Moscow: Metallurgiya, 1981. – 176 p.
7. Bokshetyn B. S. Diffuziya v metallakh. – Moscow: Metallurgiya, 1978. – 248 p.
8. Prikhod'ko M. V. Doslidzhennya vplyvu homogenizatsii na strukturni zmini v alyuminiyevomu splavi Al-Mg-Mn-Sc / [M. V. Prikhod'ko, V. V. Andreev, O. F. Lednyanskiy, O. V. Bondarenko] // Plasticheskaya deformatsiya metallov.: sb. nauchn. trudov v 2-kh tomakh. – Dnepropetrovsk : Aktsent PP, 2014. – Vol. 2. – P. 237–241.
9. A. Ye. Volkov. Deformatsiya sdvigom metodom krucheniya, osadki i pressovaniya / Volkov A. Ye. // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya. – 2016. – Vol. 16. – No 4. – P. 129–139. – DOI: 10.14529/met160415
10. J. L. Chenot / Forge 3 – a general tool for practical optimization of forging sequence of complex three-dimensional parts in industry / Chenot J. L., Fourment L., Coupez T, Ducloux R., Wey E. // Forging and Related Technology. – Birmingham, (UK). – 1998. – P. 113–122.
11. Issledovaniye reologicheskikh svoystv alyuminiyevogo splava sistemy Al-Mg-Sc / A. N. Golovko, YA. V. Frolov, V. V. Andreyev [i dr.] // Teoriya i praktika metallurgii. – 2012. – No1-2 (90-91). – P. 98–100.

Надійшла (received) 01.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ашкелянець Антон Володимирович (Ашкелянец Антон Владимирович, Ashkelianets Anton V.) – кандидат технічних наук, доцент, Національна металургійна академія України, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О. П. Чекмарьова, e-mail: ashkelyanets@metal-forming.org.

Коноводов Дмитро Володимирович (Коноводов Дмитрий Владимирович, Konovodov Dmytro V.) – кандидат технічних наук, доцент, Національна металургійна академія України, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О. П. Чекмарьова, e-mail: konovodov@metal-forming.org.

Андреев Віталій Валерійович (Андреев Виталий Валериевич, Andreev Vitalii V.) – кандидат технічних наук, Національна металургійна академія України, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О. П. Чекмарьова, e-mail: andreev@metal-forming.org.

Бондаренко Олег Віталійович (Бондаренко Олег Витальевич, Bondarenko Oleh V.) – кандидат технічних наук, доцент, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, доцент кафедри технології виробництва.